

توزیع اجزای فسفر معدنی در خاک آهکی تیمار شده با کود مرغی و فسفر در زمان‌های مختلف خواباندن

مجید حجازی مهریزی¹، مرضیه آیینه حیدری و فاطمه عباس‌زاده

استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ mhejazi@uk.ac.ir

دانشجوی کارشناسی ارشد علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ mheydari@agr.uk.ac.ir

دانشجوی کارشناسی ارشد علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ abbaszade.8898@yahoo.com

دریافت: 93/5/28 و پذیرش: 94/3/26

چکیده

کودهای آلی با تغییر شرایط شیمیایی، فیزیکی و زیستی خاک به طور مؤثری بر توازن عناصر غذایی از جمله فسفر اثر می‌گذارند. در این مطالعه تأثیر دو سطح فسفر شامل 100 و 200 میلی‌گرم بر کیلوگرم از دو منبع کود مرغی و مونوفسفات پتاسیم بر شکل‌های فسفر معدنی در یک دوره زمانی 90 روزه (5، 15، 30، 45، 60 و 90 روز) مورد بررسی قرار گرفت. شکل‌های فسفر معدنی شامل فسفر قابل استخراج با آب (H_2O-P)، فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم 0/5 مولار ($NaHCO_3-P$)، فسفر قابل استخراج با سود (فسفر متصل به آهن و آلومینیوم) و فسفر قابل استخراج با اسید (فسفات‌های کلسیم) از طریق عصاره‌گیری متوالی تفکیک و اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که در تیمار شاهد بخش عمده‌ای از فسفر معدنی خاک به صورت فسفر قابل استخراج با اسید (102-187/4 میلی‌گرم بر کیلوگرم) می‌باشد. کاربرد کود مرغی و مونوفسفات پتاسیم سبب افزایش معنی‌دار فسفر قابل استخراج با آب، سود و اسید در خاک شد. بعد از کاربرد هر دو منبع آلی و معدنی، شکل‌های لبایل و نسبتاً لبایل ($NaHCO_3-P$ و $NaOH-P$) افزایش و در انتهای دوره خواباندن به پایدارترین شکل فسفر ($Ca-P$) تبدیل شد. میزان تبدیل فسفر لبایل به شکل غیر لبایل در خاک تیمار شده با کود مرغی کمتر بود که نشان از تأثیرات مثبت این کود در افزایش شکل‌های لبایل فسفر خاک ($NaHCO_3-P$ و $NaOH-P$) برای یک دوره طولانی‌تر دارد. همبستگی بالا و معنی‌دار ($P < 0.01$) بین $NaHCO_3-P$ و فسفر قابل دسترس خاک ($r=0/81-0/93$) در تمامی زمان‌های خواباندن، نشان از نقش مهم این شکل از فسفر در تأمین فسفر مورد نیاز گیاه دارد. بر اساس نتایج این تحقیق کاربرد تلفیقی کود مرغی و کود شیمیایی در خاک‌های آهکی به عنوان راهکار افزایش فسفر قابل دسترس گیاه پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: قابلیت دسترس فسفر، عصاره‌گیری متوالی، کودهای آلی

¹ نویسنده مسئول، آدرس: کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی علوم خاک

مقدمه

فسفر یکی از عناصر اصلی مورد نیاز گیاهان بوده که کمبود آن در اراضی کشاورزی سبب محدودیت تولید محصول می‌شود (سپهر و زبردست، 1392). غلظت فسفر در گیاه در حدود 0/2 درصد وزنی بوده که نقش ذخیره‌سازی و انتقال انرژی، حفاظت و انتقال کدهای ژنتیکی و حفظ ساختار غشای سلولی را بر عهده دارد (مظلومی و رونقی، 1391). علیرغم توانایی گیاهان در جذب فسفر از محلول خاک، بسیاری از خاک‌ها قادر به تأمین نیاز گیاه نبوده و استفاده از کودهای فسفوری را اجتناب ناپذیر کرده است. در سال‌های اخیر استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی و کارایی اندک آن‌ها (20-10 درصد) در خاک‌های آهکی سبب تجمع بیش از اندازه فسفر، آلودگی محیط زیست، افزایش هزینه‌ها و برهم خوردن تعادل عناصر غذایی مورد نیاز گیاه بویژه عناصر کم‌مصرف شده است (آلن و مالارینو، 2006). در خاک‌های آهکی ایران که بیش از 60 درصد از اراضی تحت کشت را شامل می‌شوند، بخش عمده‌ای از فسفر آزاد شده از کودهای شیمیایی از طریق جذب سطحی توسط کربنات‌ها و رسوب فسفات کلسیم در مدت زمان کوتاهی به شکل غیر قابل دسترس تبدیل می‌شود. این در حالی است که یکی از اهداف اصلی کشاورزی پایدار کاهش هدرروی عناصر غذایی و افزایش کارایی مصرف کودها می‌باشد.

کاربرد پسماندهای آلی نظیر کودهای حیوانی، بقایای گیاهی و لجن فاضلاب به عنوان یکی از روش‌های رایج مدیریتی در افزایش قابلیت دسترسی فسفر و افزایش کارایی کودهای فسفوری در خاک‌های آهکی پیشنهاد شده است (اویگور و کاراباتک، 2009). پسماندهای آلی جزء مهمترین منابع در دسترس و ارزان قیمت جهت افزایش کربن آلی خاک بوده و به عنوان یک منبع سرشار از عناصر غذایی مورد نیاز گیاه از جمله فسفر شناخته می‌شوند (عل، 1995). آگاهی از مکانیسم اثرات پسماندهای آلی بر قابلیت دسترسی فسفر امری پیچیده بوده و تحت تأثیر عوامل مختلف نظیر پایداری ترکیبات آلی، ترکیب پسماند و خصوصیات خاک قرار دارد. به نظر می‌رسد تغییر دینامیک فسفر در خاک از طریق رقابت اسیدهای آلی و فسفر برای جذب روی سطوح کانی‌ها و همچنین تأخیر در تشکیل کانی‌های پایدار فسفر نظیر هیدروکسی آپاتیت از دلایل افزایش قابلیت دسترسی فسفر در خاک بعد از کاربرد پسماندهای آلی باشد (اینسکیپ و سیلورتوت، 1988). مطالعه ایچر- لوبرمن (2007) نشان داد کاربرد پسماندهای آلی به صورت یکبار

در سال در افزایش فسفر قابل جذب خاک و رشد گندم اثراتی به مراتب بهتر از کودهای شیمیایی داشت. آنها دلیل این امر را کاهش جذب سطحی فسفر در خاک تیمار شده با کود آلی گزارش کردند. خورشید و همکاران (1388) نشان دادند که کاربرد کود مرغی در خاک‌های آهکی از طریق کاهش جذب سطحی فسفر سبب کاهش نیاز استاندارد فسفر و افزایش قابلیت جذب آن شد.

به دلیل تفاوت در قابلیت جذب اجزای مختلف فسفر معدنی توسط گیاه، آگاهی از مقدار این اجزا در خاک در مدیریت بهینه فسفر و کاهش هزینه‌ها مفید می‌باشد. استفاده از روش‌های معمول آزمون خاک قادر به جداسازی اجزای فسفر در خاک نبوده و به همین دلیل روش‌های مختلف عصاره‌گیری متوالی برای این منظور پیشنهاد شده است. روش هدلی و همکاران (1982) به طور گسترده جهت تفکیک اجزای معدنی فسفر بر اساس قابلیت جذب در خاک‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته و کارایی این روش به اثبات رسیده است (ردی و همکاران، 2005؛ ورما و همکاران، 2005). کاربرد کودهای آلی می‌تواند وضعیت شکل‌های فسفر معدنی را در خاک تحت تأثیر قرار داده و از این طریق سبب تغییر قابلیت جذب فسفر در خاک گردد. هائو و همکاران (2008) نشان دادند که کاربرد طولانی مدت کود حیوانی به مدت 30 سال در یک خاک آهکی سبب افزایش معنی‌دار تمام شکل‌های معدنی فسفر شد و بیشترین تغییرات در فسفر قابل استخراج با آب و بیکربنات سدیم مشاهده شد. مطالعات ورما و همکاران (2005) نیز نشان داد که کاربرد طولانی مدت کودهای آلی و شیمیایی سبب افزایش تمامی اجزای فسفر معدنی شده است.

کود مرغی به طور متوسط حاوی 3 درصد نیتروژن، 2/63 فسفر و 1/5 درصد پتاسیم می‌باشد (فلاح و همکاران، 1388). با توجه به تولید قابل توجه این کود در کشور، کاربرد آن به عنوان یک منبع کودی جهت افزایش حاصلخیزی خاک و افزایش تولید در اراضی کشاورزی جنوب شرق کشور گسترش فراوانی پیدا کرده است. کمبود اطلاعات در ارتباط با اثرات این کود بر وضعیت و توزیع اجزای فسفر معدنی در خاک‌های این مناطق سبب شد تا مطالعه حاضر با هدف بررسی اثرات سطوح مختلف کود مرغی و کود شیمیایی فسفوری بر تغییرات زمانی اجزای فسفر معدنی در یک خاک آهکی و ارتباط هر یک از این اجزا با قابلیت جذب فسفر در زمان‌های مختلف انجام پذیرد.

مواد و روش‌ها

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

برای انجام این مطالعه یک نمونه مرکب خاک آهکی (Fine-loamy, carbonatic, mesic, Typic calciargids) با فسفر پایین در پاییز سال 1392 از شهرستان ماهان واقع در 15 کیلومتری جنوب شرقی شهر کرمان از عمق 0-30 سانتیمتری جمع‌آوری شد. نمونه خاک بعد از هواخشک شدن جهت اندازه‌گیری برخی خصوصیات خاک و آزمایش‌های خواباندن از الک دو میلیمتری عبور داده شد. جهت توزیع اندازه ذرات و تعیین بافت خاک از روش پیت بهره گرفته شد (جی و

بادر، 1986). هدایت الکتریکی (EC)، pH و مجموع کلسیم و منیزیم در عصاره 5:1 خاک به آب تعیین شد (روول، 1994). کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (واکلی و بلاک، 1934) و کربنات کلسیم به روش خشی‌سازی با اسید و تیتراسیون با سود (لوپرت و سوارز، 1996) اندازه‌گیری شد. فسفر قابل دسترس خاک بر اساس روش اولسن (اولسن و سامرز، 1982) و با استفاده از بی‌کربنات سدیم (pH=8.5) استخراج و میزان فسفر موجود در عصاره به روش رنگ‌سنجی اندازه‌گیری شد (مورفی و رایلی، 1962). برخی از خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک در جدول 1 نشان داده شده است.

جدول 1- برخی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک مورد مطالعه

بافت خاک	رس	سیلت	شن	pH	EC	آهک	کربن آلی	فسفر قابل دسترس
-	درصد	-	-	dS/m	درصد	mg/Kg	درصد	-
لومی شنی	13/1	28/6	58/3	7/7	1/7	24/03	0/7	8/2

جدول 2- مقادیر اجزای فسفر معدنی (mg kg^{-1}) در خاک مورد مطالعه

HCl-P	NaOH-P	NaHCO ₃ -P	H ₂ O-P
115/2	43/5	31/0	19/3

اجزای فسفر معدنی

برای بررسی اجزای فسفر معدنی، یک کیلوگرم از این خاک به گلدان‌هایی به ابعاد $10 \times 10 \times 13$ سانتیمتر انتقال یافت. فسفر در دو سطح 100 و 200 میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از دو منبع کود مرغی (pH: 5/7، کربن آلی: 35 درصد، C/N: 11/66 و فسفر: 0/54 درصد) و شیمیایی (مونو فسفات پتاسیم) در سه تکرار به خاک اضافه و به طور کامل با خاک مخلوط گردید. در طول دوره 90 روز خواباندن، رطوبت گلدان‌ها با استفاده از آب مقطر در حد 80 درصد ظرفیت مزرعه از طریق روش وزنی نگهداری در دمای 25 درجه سانتی‌گراد شد. در زمان‌های 5، 15، 30، 45، 60 و 90 روز بعد از خواباندن، نمونه‌های فرعی از گلدان‌ها برداشت و اجزای فسفر معدنی در آن‌ها اندازه‌گیری شد. برای تعیین اجزای فسفر معدنی از روش هدلی و همکاران (1982) اصلاح شده توسط سوئی و همکاران (1999) استفاده شد. بر اساس این روش یک گرم خاک از نمونه‌های فرعی به طور متوالی به مدت 16 ساعت با (1)

30 میلی‌لیتر آب مقطر¹، (2) بیکربنات سدیم 0/5 مولار تنظیم شده در pH=8.2²، (3) سود 0/1 مولار³ و (4) اسید کلریدریک 1 مولار⁴ عصاره‌گیری و فسفر موجود در عصاره بر اساس روش رنگ‌سنجی مورفی و رایلی (1962) و به کمک دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج 780 نانومتر تعیین شد. همچنین اجزای فسفر معدنی در نمونه خاک مورد آزمایش قبل از افزودن کود نیز به روش عصاره‌گیری متوالی اندازه‌گیری شد (جدول 2).

برای تعیین میزان فسفر قابل دسترس خاک بر اساس روش اولسن و سامرز (1982) 5 گرم از نمونه‌های فرعی با 100 میلی‌لیتر بیکربنات سدیم 0/5 مولار تنظیم شده در pH=8.5 به مدت 0/5 ساعت عصاره‌گیری و میزان فسفر موجود در عصاره توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج 780 نانومتر اندازه‌گیری شد.

1. H₂O-P

2. NaHCO₃-P

3. NaOH-P

4. HCl-P

تجزیه آماری

مطالعه حاضر به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. یک نمونه خاک، 5 تیمار کودی، 6 زمان نمونه برداری و 3 تکرار سبب تشکیل 90 آزمایشی شد. برای بررسی اثر تیمار کودی و زمان خواباندن بر اجزای فسفر معدنی از تجزیه واریانس یک طرفه به کمک نرم افزار SPSS 18.0 بهره گرفته شد. مقایسه میانگین داده‌ها بر اساس آزمون دانکن در سطح 5 درصد انجام شد. برای بررسی ارتباط اجزای فسفر معدنی با فسفر قابل دسترس خاک آزمون همبستگی پیرسون استفاده شد.

نتایج و بحث

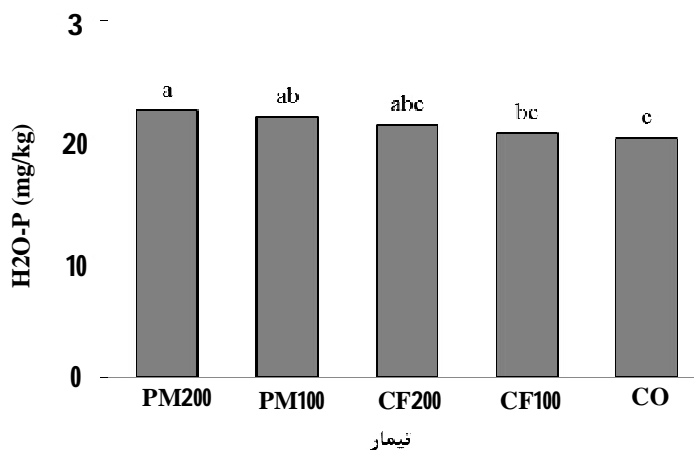
فسفر قابل استخراج با آب

فسفر قابل استخراج با آب کمترین مقدار را در بین سایر اجزا به خود اختصاص داد، اما با توجه به قابلیت و سرعت جذب بالای این بخش از فسفر معدنی توسط گیاه افزایش ناچیز در مقدار آن می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر رشد گیاهان داشته باشد (سالک و همکاران، 2004). تجزیه واریانس نشان داد که مقدار فسفر قابل استخراج با آب به طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمارهای کودی قرار گرفت ولی اثر زمان و اثر متقابل زمان در تیمار معنی‌دار نشد (جدول 3).

جدول 3- تجزیه واریانس (مقادیر F) اثر تیمارهای کودی فسفر و زمان خواباندن بر شکل‌های فسفر معدنی

فسفر قابل دسترس	HCl-P	NaOH-P	NaHCO ₃ -P	H ₂ O-P	درجه آزادی	منابع تغییرات
0/64 ^{ns}	0/25 ^{ns}	0/66 ^{ns}	0/64 ^{ns}	0/61 ^{ns}	2	تکرار
91/22 ^{**}	11/70 ^{**}	31/60 ^{**}	196/10 ^{**}	6/20 ^{**}	4	تیمار
3/88 ^{**}	7/70 ^{**}	5/10 ^{**}	4/20 ^{**}	1/40 ^{ns}	5	زمان خواباندن
8/82 ^{**}	0/70 ^{ns}	2/65 ^{**}	6/40 ^{**}	1/20 ^{ns}	20	تیمار × زمان
					58	خطای آزمایش

ns: عدم معنی‌داری ** : معنی‌دار در سطح یک درصد



شکل 1- تأثیر کاربرد 100 و 200 میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک از منبع کود مرغی (PM) و شیمیایی (CF) بر فسفر قابل استخراج با آب در مقایسه با تیمار شاهد (CO) (حروف مشابه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح 5 درصد می‌باشد).

شد. به نظر می‌رسد جذب سطحی فسفر توسط کربنات‌ها و رسوب فسفر به صورت کانی‌های پایدار فسفات کلسیم در تیمار کود شیمیایی سبب کاهش معنی‌دار فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم شده است. این نتایج با نتایج ژانگ و همکاران، 2004، حلاج نیا و همکاران، 2009 همخوانی دارد.

در سطح اول و دوم کود مرغی، گذشت زمان سبب افزایش معنی‌دار فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم شد و در زمان 60 روز بعد از خواباندن به بیشترین مقدار (136/2 میلی‌گرم بر کیلوگرم در سطح اول و 336/6 میلی‌گرم بر کیلوگرم در سطح دوم) رسید. شروع روند کاهش در فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم بعد از 60 روز را می‌توان ناشی از کاهش معدنی شدن فسفر و همچنین تبدیل این بخش از فسفر به شکل‌های پایدارتر دانست. با توجه به بالا بودن مقدار $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ در پایان دوره خواباندن در هر دو سطح کود مرغی، این کود به عنوان یک منبع تأمین کننده پایدار فسفر می‌تواند مورد توجه قرارگیرد. همبستگی بالای بین این شکل فسفر و فسفر اولسن در تمامی زمان‌های خواباندن این نظریه را تأیید می‌کند (جدول 4).

فسفر قابل استخراج با سود

فسفر قابل استخراج با سود بخشی از فسفر معدنی است که توسط اکسیدها و هیدروکسیدهای بلورین و آمورف آهن و آلومینیوم جذب شده و به سرعت کمتری در مقایسه با دو جزء قبلی در اختیار گیاه قرار می‌گیرد (نگاسا و لین وبر، 2009). نتایج نشان داد که فسفر قابل استخراج با سود به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) تحت تأثیر تیمارهای کودی، زمان و اثرات متقابل آنها قرار گرفت (جدول 3).

صرفنظر از زمان خواباندن، مقدار NaOH-P در تیمارهای مختلف کودی به صورت 200 کود مرغی < 100 کود مرغی \approx 200 کود شیمیایی \approx 100 کود شیمیایی < شاهد اندازه‌گیری شد. در هر دو سطح کود مرغی با گذشت زمان مقدار فسفر قابل استخراج با سود افزایش یافت و بعد از 45 روز به بیشترین مقدار (125/5 و 148/2 میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب در سطح اول و دوم کود مرغی) رسید و سپس با گذشت زمان از مقدار آن کاسته شد (شکل 3). افزایش اولیه در مقدار فسفر قابل استخراج با سود می‌تواند مربوط به آزاد شدن فسفر محلول موجود در کود مرغی باشد اویگور و کاراباتک (2009) و دو و همکاران (2000) نشان دادند که با کاربرد تعدادی از کودهای آلی فسفر قابل استخراج با سود در روزهای اولیه افزایش یافت. همچنین گزارش‌ها نشان

کاربرد مقادیر 100 و 200 میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر از کود مرغی سبب افزایش معنی‌دار (در سطح 5 درصد) فسفر قابل استخراج با آب در مقایسه با تیمار شاهد شد (شکل 1). این افزایش می‌تواند ناشی از افزوده شدن فسفر محلول از کود مرغی به خاک، معدنی شدن فسفر آلی، رقابت اسیدهای آلی با فسفر در جذب سطحی و تبدیل از شکل‌های دیگر فسفر باشد. این نتایج با نتایج هائو و همکاران (2008) مبنی بر افزایش فسفر محلول بعد از کاربرد طولانی مدت کود حیوانی مطابقت دارد. کاربرد سطوح 100 و 200 میلی‌گرم فسفر از منبع کود شیمیایی تغییر معنی‌داری را در فسفر قابل استخراج با آب در مقایسه با تیمار شاهد ایجاد نکرد که می‌تواند ناشی از تبدیل سریع فسفر محلول کود شیمیایی به شکل‌های پایدارتر نظیر فسفات کلسیم باشد (شکل 1). بر همین اساس کود شیمیایی در مقایسه با کود مرغی کارایی کمتری در تأمین فسفر مورد نیاز گیاه را دارا هستند.

فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم

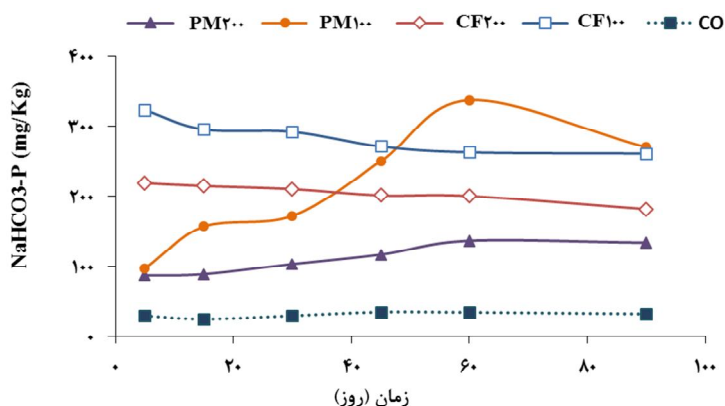
این بخش از فسفر معدنی خاک نشان دهنده فسفوری است که به صورت غیر اختصاصی و کمپلکس سطحی جذب سطوح اجزای خاک شده و به همراه فسفر قابل استخراج با آب به عنوان قابل دسترس‌ترین شکل فسفر خاک شناخته می‌شود (ردی و همکاران، 2005). فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم به طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمارهای کودی، زمان و اثرات متقابل آنها قرار گرفت (جدول 3). صرفنظر از زمان خواباندن، بیشترین مقدار $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ (284/1 میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) در سطح دوم کود مرغی و کمترین مقدار (30/9 میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار شاهد اندازه‌گیری شد. اختلافی از لحاظ $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ بین سطح اول کود مرغی و سطح دوم کود شیمیایی مشاهده نشد که نشان از اثرات قابل توجه کود مرغی در افزایش شکل‌های قابل دسترس فسفر در مقایسه با کود شیمیایی دارد (شکل 2). مطالعات سایر محققان نیز نشان می‌دهد که کاربرد کودهای آلی سبب افزایش فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم شده است (والدریپ-دیل و همکاران، 2009؛ اویگور و کاراباتک، 2009).

توزیع زمانی فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم در تیمار کود مرغی و تیمار کود شیمیایی با یکدیگر تفاوت معنی‌داری را نشان داد (شکل 2). با گذشت زمان مقدار فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم در هر دو سطح کود شیمیایی کاهش یافت و در زمان 90 روز پس از خواباندن به ترتیب کاهش 17 و 19 درصدی در $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ در مقایسه با روز پنجم خواباندن مشاهده

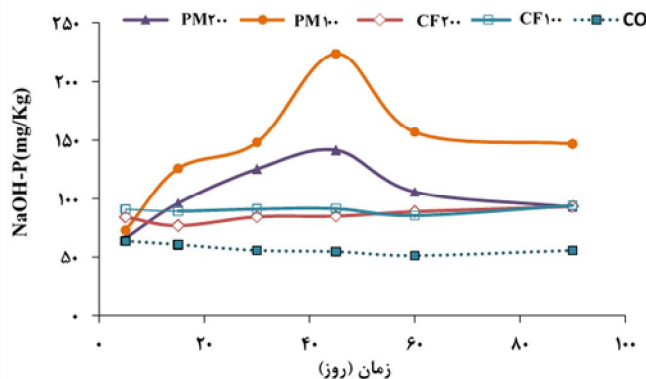
تیمار شاهد تغییرات معنی‌داری با گذشت زمان در این بخش از فسفر مشاهده نشد. در برخی از منابع فسفر قابل استخراج با سود به عنوان فسفر نسبتاً قابل دسترس شناخته می‌شود و لذا افزایش آن در خاک می‌تواند در طولانی مدت به تغذیه فسفر گیاه کمک کند (ورما و همکاران، 2005؛ بک و سانچز، 1994). بخشی از افزایش قابلیت دسترسی فسفر در خاک بعد از کاربرد کود مرغی را می‌توان به افزایش NaOH-P در خاک نسبت داد. اگرچه کاربرد دو سطح 100 و 200 میلی‌گرم فسفر از منبع کود شیمیایی سبب افزایش معنی‌دار فسفر قابل استخراج با سود در مقایسه با تیمار شاهد شد، اما با گذشت زمان تغییری در مقدار این شکل از فسفر مشاهده نشد (شکل 3). نتایج به دست آمده با نتایج حلاج نیا و همکاران (2009) در تعدادی از خاک‌های آهکی مشهد همخوانی دارد.

می‌دهد که فسفر متصل به اکسیدهای آهن و آلومینیوم می‌تواند تحت تأثیر شرایط ریداکس موقت خاک قرار گرفته (مور و ردی، 1994) و بر همین اساس به بخش‌های دیگر تبدیل و یا از بخش‌های دیگر تشکیل شود. به نظر می‌رسد در تیمارهای کود مرغی با گذشت زمان و افزایش فعالیت میکروبی، شرایط بی‌هوازی موقت ایجاد و کاهش ریداکس خاک سبب افزایش مقدار اکسیدهای آهن و آلومینیوم آمورف و افزایش NaOH-P شده است. مطالعه اختر و همکاران (2002) نیز نشان داد که کاربرد لجن فاضلاب در کوتاه مدت می‌تواند از طریق افزایش اکسیدهای آمورف آهن و آلومینیوم، مقدار فسفر متصل به این کانی‌ها را در خاک افزایش دهد.

والدریپ-دیل و همکاران (2011) نیز نشان دادند که کاربرد کود مرغی به مدت 16 هفته سبب افزایش معنی‌دار NaOH-P در ریزوسفر چمن شد در حالی که در



شکل 2- توزیع زمانی فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات سدیم در سطوح 100 و 200 میلی‌گرم فسفر از منبع کود مرغی (PM) و شیمیایی (CF) به همراه تیمار شاهد (CO)



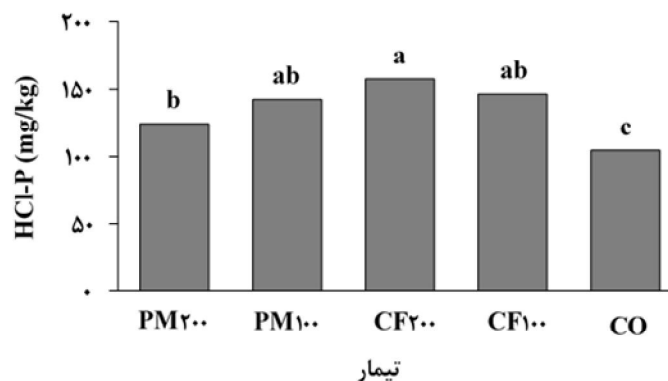
شکل 3- توزیع زمانی فسفر قابل استخراج با سود در سطوح 100 و 200 میلی‌گرم فسفر از منبع کود مرغی (PM) و شیمیایی (CF) به همراه تیمار شاهد (CO)

فسفر قابل استخراج با اسید

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که تنها اثرات اصلی تیمارهای کودی و زمان به طور معنی‌داری سبب تغییر فسفر قابل استخراج با اسید گردید (جدول 3). کاربرد هر دو سطح 100 و 200 میلی‌گرم فسفر از منبع شیمیایی افزایش 40 و 51 درصدی HCl-P را در مقایسه با تیمار شاهد را به همراه داشت (شکل 4). در خاک‌های خنثی تا آهکی مناطق خشک و نیمه خشک، فسفات‌های کلسیم و منیزیم به عنوان پایدارترین فاز جامد کنترل‌کننده فسفر در خاک محسوب می‌شود (هدلی، 1982). فسفر محلول موجود در کود از طریق واکنش با کربنات کلسیم سبب تشکیل شکل‌های مختلف فسفات کلسیم در خاک و کاهش قابلیت جذب فسفر توسط گیاه می‌شود (وو و همکاران، 2008). در این تحقیق نیز با توجه به ماهیت آهکی و pH بالای خاک مورد مطالعه افزایش تشکیل فسفات‌های کلسیم در خاک بعد از کاربرد دو سطح از کود شیمیایی قابل انتظار بود.

کاربرد کود مرغی در هر دو سطح 100 و 200 میلی‌گرم فسفر نیز سبب افزایش HCl-P نسبت به شاهد گردید اگرچه اختلاف معنی‌داری از این لحاظ بین سطح اول و دوم مشاهده نشد. آزاد شدن کلسیم و فسفر از کود مرغی می‌تواند سبب افزایش تشکیل فسفات‌های کلسیم با درجات حلالیت مختلف در خاک شود. ساتو و همکاران (2005) نشان دادند که کاربرد کود آلی در کوتاه مدت سبب تشکیل شکل‌های آمورف فسفات کلسیم با حلالیت نسبتاً زیاد می‌شود در حالی که با گذشت زمان تشکیل شکل‌های پایدارتر فسفات کلسیم نظیر تری‌کلسیم فسفات سبب کاهش قابلیت جذب فسفر در خاک می‌شود. در

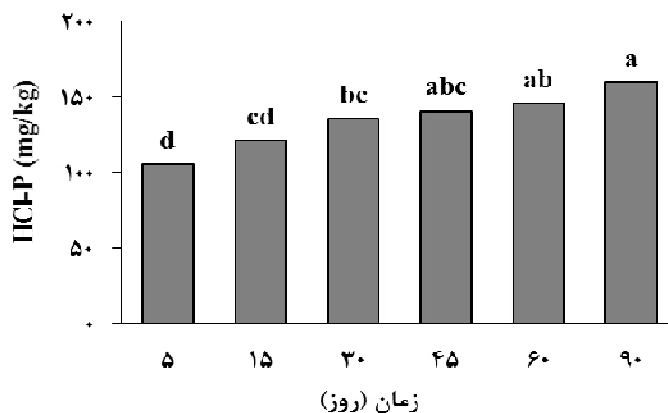
مورد اثرات کودهای آلی بر HCl-P نتایج ضد و نقیضی موجود می‌باشد. در مطالعه‌ای که توسط والدربپ-دیل و همکاران (2009) در یک خاک آهکی صورت گرفت، کاربرد 108 روزه کود مرغی به میزان 200 میلی‌گرم بر کیلوگرم تغییری در فسفر قابل استخراج با اسید ایجاد نکرد. در مقابل هی و همکاران (2008) افزایش فسفر قابل استخراج با اسید را بعد از کاربرد 20 ساله کود مرغی گزارش کردند. فسفر قابل استخراج با اسید بخشی از فسفر معدنی است که توسط کانی‌های کربناته کلسیم جذب و توسط آنها تثبیت شده است و لذا تغییر در حلالیت کربنات کلسیم می‌تواند مقدار این بخش از فسفر را تحت تأثیر قرار دهد (والدربپ-دیل، 2011). بر همین اساس کودهایی که بتوانند نقش مؤثرتری در کاهش pH خاک داشته باشند می‌توانند سبب کاهش HCl-P در خاک شوند. در این مطالعه مقدار فسفر قابل استخراج با اسید در تیمار 200 میلی‌گرم فسفر از منبع کود مرغی کمتر از تیمار 100 میلی‌گرم کود مرغی بود هر چند این اختلاف از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (شکل 4). به نظر می‌رسد در تیمار 200 کود مرغی کاهش pH ناشی از آزاد شدن اسیدهای آلی سبب افزایش جزئی حلالیت بخشی از فسفات‌های کلسیم و کاهش جزئی این بخش از فسفر معدنی شده است. همچنین رقابت اسیدهای آلی با فسفر در جذب سطحی توسط کربنات کلسیم می‌تواند دلیل دیگری بر کاهش HCl-P در خاک باشد. استرم و همکاران (2002) بیان کردند که در خاک‌های آهکی اسید آلی اگزالیک از طریق کاهش pH و تشکیل اگزالات کلسیم سبب افزایش رهاسازی فسفر موجود در کانی‌های فسفات کلسیم می‌شود.



شکل 4- تأثیر کاربرد 100 و 200 میلی‌گرم فسفر از منبع کود مرغی (PM) و شیمیایی (CF) در مقایسه تیمار شاهد (CO) بر فسفر قابل استخراج با اسید (حروف مشابه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح 5 درصد می‌باشد)

که توسط ردی و همکاران (2005) در یک خاک آلفی سول انجام شد کاربرد کود شیمیایی بعد از 16 هفته سبب افزایش فسفر قابل استخراج با اسید شد. اختلاف معنی‌داری از لحاظ فسفر قابل استخراج با اسید در بین زمانهای 30 تا 90 روز مشاهده نشد که ناشی از پایداری بالای این کانی در خاک‌های آهکی می‌باشد.

در تمامی تیمارها گذشت زمان سبب افزایش معنی‌دار HCl-P شد به طوری که زمان 90 روز با مقدار 159/6 میلی‌گرم بر کیلوگرم در بالاترین سطح آماری قرار داشت (شکل 5). این نتایج مؤید این مطلب است که فسفر محلول آزاد شده از کود شیمیایی و مرغی با گذشت زمان از طریق جذب توسط کربنات کلسیم به شکل فسفات کلسیم در خاک رسوب کرده است. در مطالعه‌ای



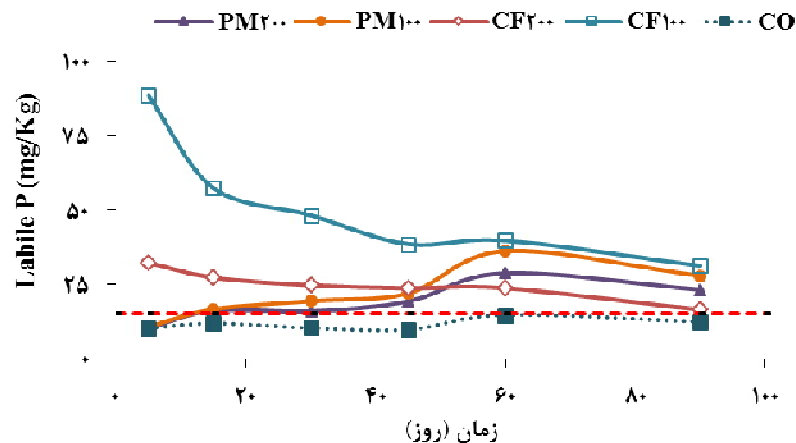
شکل 5- تأثیر زمان خواباندن بر فسفر قابل استخراج با اسید (حروف مشابه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح 5 درصد می‌باشد)

افزایش و سپس روند کاهشی در پیش گرفت هر چند در پایان دوره خواباندن میزان فسفر قابل دسترس در هر دو سطح کود مرغی از حد بحرانی کمبود فسفر بالاتر بود. به همین دلیل کاربرد تلفیقی کود مرغی و شیمیایی جهت تأمین پایدار فسفر مورد نیاز گیاه توصیه می‌شود. افزایش معدنی شدن فسفر به همراه کاهش pH و افزایش حلالیت فسفات‌های کلسیم را می‌توان از دلایل افزایش فسفر قابل دسترس خاک بعد از کاربرد کود مرغی ذکر کرد (هائو و همکاران، 2008). مقایسه کود شیمیایی و کود مرغی نشان داد که در انتهای دوره آزمایش سطوح دوم کود مرغی و کود شیمیایی تأثیر تقریباً مشابهی بر مقدار فسفر قابل دسترس داشتند.

فسفر قابل دسترس خاک¹

نتایج نشان داد که مقدار فسفر قابل دسترس خاک تحت تأثیر تیمارهای کودی، زمان و اثر متقابل آن‌ها قرار گرفت (جدول 3). صرف‌نظر از زمان خواباندن بیشترین مقدار فسفر قابل دسترس به میزان 50/6 میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار 200 کود شیمیایی و کمترین مقدار به میزان 11/0 میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار شاهد اندازه‌گیری شد (شکل 6). هیچ اختلاف معنی‌داری بین سطوح 100 و 200 میلی‌گرم کود مرغی و 100 کود شیمیایی مشاهده نشد که نشان از اثرات مشابه این سطوح کودی در افزایش فسفر قابل دسترس خاک دارد. در طول دوره خواباندن سطوح مختلف کود مرغی و شیمیایی اثرات متفاوتی را بر فسفر قابل دسترس خاک داشتند. با گذشت زمان میزان فسفر قابل دسترس در سطوح 100 و 200 کود شیمیایی به طور معنی‌داری کاهش یافت که این کاهش در مورد سطح دوم چشمگیرتر بود. به همین دلیل و با توجه به هزینه بالای تولید کود فسفوری، کاربرد سطح بالای کود شیمیایی در این خاک توصیه نمی‌شود. در تیمار کود مرغی با گذشت زمان تا 60 روز فسفر قابل دسترس

¹ Labile P



شکل 6- تأثیر متقابل زمان و سطوح کاربردی 100 و 200 میلی گرم فسفر از منبع کود مرعی (PM) و شیمیایی (CF) به همراه تیمار شاهد (CO) بر فسفر قابل دسترس خاک (خط قرمز منقطع در نمودار بیانگر حد بحرانی فسفر در خاک‌های آهکی می‌باشد)

ارتباط شکل‌های فسفر معدنی با فسفر قابل دسترس

فسفر آزاد می‌شود و به عبارت بهتر این شکل‌ها می‌توانند نقش مؤثرتری در تأمین فسفر مورد نیاز گیاه ایفا نمایند. مطالعه بک و سانچز (1994) نشان داد که تنها NaOH-P به عنوان منبع تأمین کننده فسفر قابل دسترس عمل می‌کند در حالی که در مطالعه ورما و همکاران (2005) و ژانگ و همکاران (2004) به همبستگی بالای HCl- و NaHCO₃-P با فسفر قابل دسترس اشاره شده است.

نتایج آزمون همبستگی بین هر یک از شکل‌های فسفر معدنی خاک با فسفر قابل دسترس در جدول 4 نشان داده شده است. به غیر از فسفر قابل استخراج با آب، سایر شکل‌های فسفر معدنی با فسفر قابل دسترس ارتباط معنی‌داری داشتند و در تمامی زمان‌ها بیشترین ضریب همبستگی بین NaHCO₃-P و فسفر قابل دسترس مشاهده شد. این نتایج بیانگر آن است که فسفر عصاره-گیری شده به روش اولسن به احتمال زیاد از این شکل

جدول 4- ضرایب همبستگی بین فسفر قابل دسترس و شکل‌های فسفر معدنی

HCl-P	NaOH-P	NaHCO ₃ -P	H ₂ O-P	زمان خواباندن
0/08	0/88**	0/93**	0/52	5 روز
0/58	-0/01	0/89**	-0/13	15 روز
0/40	-0/02	0/92**	0/26	30 روز
0/61*	0/07	0/86**	0/27	45 روز
0/63*	0/88**	0/91**	0/54	60 روز
0/66*	0/44	0/81**	-0/39	90 روز

* معنی‌داری در $P < 0.05$ و ** معنی‌داری در $P < 0.01$

داشت و حدود 80 درصد از تغییرات فسفر قابل دسترس را توجیه کرد در حالی که در زمان‌های پایانی NaOH-P بیشترین سهم را به خود اختصاص داد (جدول 5). ژانگ و مکزی (1997) اظهار داشتند که NaOH-P می‌تواند به عنوان یک ذخیره‌گاه فسفر افزوده شده به خاک از طریق کود عمل کند و در زمان‌های مختلف سطح کافی از فسفر قابل دسترس گیاه را در خاک را از طریق فرایند رهاسازی تأمین نماید. بر اساس نتایج این مطالعه در زمان‌های پایانی

از آنجا که تمامی شکل‌های فسفر معدنی با فسفر قابل دسترس خاک همبستگی نشان دادند، از آزمون رگرسیون گام به گام جهت تعیین مؤثرترین شکل فسفر معدنی در افزایش فسفر قابل دسترس خاک بهره گرفته شد. نتایج آزمون رگرسیون گام به گام نشان داد که در فاصله زمانی شروع خواباندن تا زمان 45 روز- NaHCO₃-P بیشترین نقش را در افزایش فسفر قابل دسترس خاک

دسترس از کود شیمیایی بیشتر بود. به نظر می‌رسد که کاربرد کود مرغی از طریق کاهش جذب سطحی فسفر، کاهش تشکیل شکل‌های کریستالی پایدار فسفات کلسیم و افزایش شکل‌های محلول‌تر فسفر نظیر NaOH-P و $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ سبب افزایش قابلیت دسترسی در خاک شده است. بر همین اساس می‌توان از کود مرغی به عنوان یک تأمین کننده پایدار فسفر در خاک بهره گرفت. هر چند در زمان‌های اولیه به دلیل رهاسازی کم فسفر از کود مرغی و با توجه به این که حد بحرانی فسفر در خاک‌های استان کرمان 15 میلی‌گرم بر کیلوگرم تعیین شده است، کاربرد مستقل کود مرغی تأمین کننده نیاز فسفر گیاه نیست. به همین دلیل کاربرد همزمان کود شیمیایی و کود مرغی جهت افزایش فسفر قابل دسترس خاک و تأمین پایدار فسفر مورد نیاز گیاهان پیشنهاد می‌شود.

خواباندن با کاهش $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ ، فسفر قابل استخراج به سود می‌تواند به عنوان تأمین کننده فسفر قابل دسترس در خاک عمل نماید.

نتیجه‌گیری

توزیع شکل‌های فسفر معدنی در خاک قبل از کاربرد کود مرغی و شیمیایی از روند $\text{HCl-P} > \text{NaOH-P} > \text{NaHCO}_3\text{-P} > \text{H}_2\text{O-P}$ تبعیت کرد. این روند بعد از کاربرد کود شیمیایی به صورت $\text{NaHCO}_3\text{-P} > \text{HCl-P} > \text{NaOH-P} > \text{H}_2\text{O-P}$ و بعد از کاربرد کود مرغی به صورت $\text{NaHCO}_3\text{-P} > \text{NaOH-P} > \text{HCl-P} > \text{H}_2\text{O-P}$ تغییر یافت. با گذشت زمان در هر دو سطح کود شیمیایی فسفر قابل استخراج با بیکربنات کاهش و فسفر قابل استخراج با اسید افزایش یافت که درصد تغییرات این شکل‌ها در سطح دوم بیشتر بود. با توجه به پایداری HCl-P در خاک، کاربرد سطوح کمتر کود شیمیایی به صورت چندباره در این خاک جهت کاهش هزینه‌ها توصیه می‌شود. در پایان دوره خواباندن اثرات کود مرغی در افزایش فسفر قابل

جدول 5- رگرسیون گام به گام فسفر قابل دسترس خاک با شکل‌های فسفر معدنی در زمان‌های مختلف خواباندن

ΔR^2	R^2	متغیرهای مستقل	
-	0/072	NaOH-P	5 روز
0/825	0/897	NaOH-P+NaHCO ₃ -P	
0/011	0/908	NaOH-P+NaHCO ₃ -P+HCl-P	
-	0/012	NaOH-P	15 روز
0/838	0/850	NaOH-P+NaHCO ₃ -P	
0/140	0/990	NaOH-P+NaHCO ₃ -P+HCl-P	
-	0/022	NaOH-P	30 روز
0/869	0/891	NaOH-P+NaHCO ₃ -P	
0/099	0/990	NaOH-P+NaHCO ₃ -P+HCl-P	
-	0/073	NaOH-P	45 روز
0/859	0/932	NaOH-P+NaHCO ₃ -P	
0/003	0/935	NaOH-P+NaHCO ₃ -P+HCl-P	
-	0/877	NaOH-P	60 روز
0/056	0/933	NaOH-P+NaHCO ₃ -P	
0/006	0/939	NaOH-P+NaHCO ₃ -P+HCl-P	
-	0/536	NaOH-P	90 روز
0/366	0/902	NaOH-P+NaHCO ₃ -P	
0/088	0/990	NaOH-P+NaHCO ₃ -P+HCl-P	

فهرست منابع:

1. خورشید، م، ع. حسین‌پور و ش. اوستان. 1388. تأثیر کود مرغی بر ویژگی‌های جذب و نیاز استاندارد فسفر در برخی از خاک‌های آهکی استان همدان. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. 40: 139-147.
2. فلاح، س.، ا. قلاوند، د. قنبریان و ع. یدوی. 1388. اثر مقدار و نحوه اختلاط کود مرغی بر برخی خصوصیات خاک و عملکرد گیاه ذرت. نشریه آب و خاک. 3: 78-87.
3. سپهر، ا. و ر. زبردست. 1392. تأثیر اسید هومیک بر رفتار جذبی فسفر در یک خاک آهکی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، 27: 720-731.
4. مظلومی، ف.، و ع. رونقی. 1391. اثر شوری و فسفر بر رشد و ترکیب شیمیایی دو رقم اسفناج. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای، 9: 85-94.
5. Akhtar, M., D.L. Mccallister and K.M. Eskridge, 2002. Availability and fractionation of phosphorus in sewage sludge amended soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33:2057-2068.
6. Allen, B.L., and A.P. Mallarino, 2006. Relationships between Extractable Soil Phosphorus and Phosphorus Saturation after Long-Term Fertilizer or Manure Application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:454-463.
7. Beck, M.A., and P.A. Sanchez, 1994. Soil phosphorus dynamics during 18 years of cultivation in a Typic Paleudult. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 58:1424-1431.
8. Dou, Z., J.D. Toth, D.T., Galligan, C.F., Rambergm and J.D., Ferguson, 2000. Laboratory procedures for characterizing manure phosphorus. *J. Environ. Qual.* 29:508-514.
9. Eicher-Loberman, B., S. Kohne and D. Koppen, 2007. Effect of organic, inorganic, and combined organic and inorganic P fertilization on plant P uptake and soil P pools. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 170:623-628.
10. Gee, G.W., and J.W. Bauder, 1986. Particle size analysis. In: A. Klute (ed) *Method of soil analysis*. ASA and SSSA, Madison, pp 383-409.
11. Halajnia, A., G.H. Haghnia, A. Fotovat and R. Khorasani, 2009. Phosphorus fractions in calcareous soils amended with P fertilizer and cattle manure. *Geoderma.* 150:209-213.
12. He, Z., C.W. Honeycutt, B.J. Cade-Menun, Z.N. Senwo and I.A. Tazisong, 2008. Phosphorus in poultry litter and soil: enzymatic and nuclear magnetic resonance characterization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:1425-1433
13. Hedley, M.J., W.B. Stewart and B.S. Chauhan, 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Am. J.* 49:970-976.
14. Hao, X., F. Godlinski and C. Chang, 2008. Distribution of phosphorus forms in soil following long-term continuous and discontinuous cattle manure application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:90-97.
15. Inskeep, W.P., and J.C. Silvertooth, 1988. Inhibition of hydroxyapatite precipitation in the presence of fulvic, humic and tannic acids. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:941-946.
16. Lal, R. 1995. The role of residues management in sustainable agricultural systems. *J. Sustainable Agric.* 5:51-78.
17. Loppert, R.H., and D.L. Suarez, 1996. Carbonates and gypsum. In: DL Sparks (ed). *Method of soil analysis*. ASA and SSSA, Madison, pp 437-474.
18. Moore, P.A., and K.A. Reddy, 1994. Role of Eh and pH on phosphorus geochemistry in sediments of lake Okeechobee. Florida, *J. Environ. Qual.* 23:955-964.

19. Murphy, J., and J.P. Riley, 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Anal Chim Acta*. 27:31-36.
20. Negassa, W., and P. Leinweber, 2009. How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: A review. *J. Plant Nutr. Soil Sci*. 172:305-325.
21. Olsen, S.L., and S.E. Sommers, 1982. Phosphorus. p. 403-427. In: A.L. Page et al. (ed.). *Methods of soil analysis*. Part 2, 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9, ASA and SSSA, Madison WI.
22. Reddy, D.D., S.A. Rao and M. Singh, 2005. Changes in P fractions and sorption in an alfisol following residues application. *J. Plant Nutr. Soil Sci*. 168:241-247.
23. Rowell, D.L. 1994. *Soil Science: Methods and Applications*. Longman Group, Harlow. p. 345.
24. Saleque, M.A., U.A. Naher, A. Islam, A.B.M.B.U. Pathan, A.T.M.S. Hossain and C.A. Meisner, 2004. Inorganic and organic phosphorus fertilizer effects on the phosphorus fractionation in wetland rice soils. *Soil Sci. Soc. Am. J*. 68:1635-1644.
25. Sato, S., D. Solomon, C. Hyland, Q.M. Ketterings and J. Lehmann, 2005. Phosphorus speciation in manure and manure-amended soils using XANES spectroscopy. *Environ. Sci. Technol*. 39:7485-7491.
26. Storm, L., A.G. Owen, D.L. Godbold and D.L. Jones, 2002. Organic and mediated P mobilization in the rhizosphere and uptake by maize roots. *Soil Biology and Biochemistry*. 37:2046-2054.
27. Sui, Y., M.L. Thompson and C. Shang, 1999. Fractionation of phosphorus in a mollisol amended with biosolids. *Soil Sci. Soc. Am. J*. 63:1174-1180.
28. Uygur, V., and I. Karabatak, 2009. The effect of organic amendments on mineral phosphate fractions in calcareous soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci*. 172:336-345.
29. Verma, S., S.K. Subehia and S.P. Sharma, 2005. Phosphorus fractions in an acid soil continuously fertilized with mineral and organic fertilizers. *Biol. Fertil. Soils*. 41:295-300.
30. Vu, D.T., C. Tang and R.D. Armstrong, 2008. Changes and availability of P fractions following 65 years of P application to calcareous soil in Mediterranean climate. *Plant Soil*. 304:21-33.
31. Walkley, A., and I.A. Black, 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid in soil analysis. 1. *Experimental. Soil Sci*. 79:459-465.
32. Waldrip-Dail, H., Z. He and M. Susan Erich, 2011. Effects of poultry manure amendment on phosphorus uptake by ryegrass, soil phosphorus fractions and phosphatase activity. *Biol. Fertil. Soils*. 47:407-418.
33. Waldrip -Dail, H., Z. He, and M. Susan Erich and W.C. Honeycutt, 2009. Soil phosphorus dynamics in response to poultry manure amendments. *Soil Sci*. 174:195-201.
34. Zhang, T.Q., A.F. Mackenzie, B.C. Liang and C.F. Druy, 2004. Soil test phosphorus and phosphorus fractions with long term phosphorus addition and depletion. *Soil Sci. Soc. Am. J*. 68:519-528.
35. Zhang, T.Q., and A.F. Mackenzie, 1997. Changes in phosphorus fractions under continuous corn production in a temperate clay soil. *Plant soil*. 192:133-139.